

**Розроблення математичних моделей витікання газу та його розповсюдження в атмосферному повітрі при аварійному фонтануванні свердловини****Т. М. Яцишин, Л. Є. Шкіца, О. О. Попов, М. М. Лях**

Дослідження присвячено розробці нових математичних засобів для визначення розподілу в просторі та часі техногенного навантаження на атмосферне повітря в результаті непалаючого фонтанування газової свердловини. На сьогоднішній день моделювання є єдиним інструментом дослідження та вирішення актуальних задач екологічної безпеки експлуатації газоконденсатних родовищ. Особливо це стосується тих питань, відповіді на які неможливо отримати на практиці, а саме дослідження причин та прогнозування розвитку аварій з малою ймовірністю виникнення, але з великими руйнівними наслідками. Відзначено недоліки існуючих математичних моделей та методик, що не дозволяє їх використання для моделювання забруднення атмосфери саме при непалаючому фонтануванні газової свердловини. Задача прогнозування рівня та розподілу забруднення атмосферного повітря при відкритому фонтануванні газової свердловини включає два етапи: визначення обсягів газових викидів, їх параметрів і складу; розрахунок розсіювання шкідливих речовин в приземному шарі атмосфери. Досліджено фізичні особливості руху газової суміші по свердловині та розповсюдження домішок в атмосферному повітрі при непалаючому фонтануванні. Розроблено математичні моделі усталеного та залпового витікання суміші газів з свердловини у вигляді диференціальних рівнянь з відповідними початковими та граничними умовами. Дані моделі враховують всі основні фактори, що впливають на інтенсивність викиду газової суміші при аварійному фонтануванні, та адекватно описують даний процес. Розроблено нову математичну модель розповсюдження забруднюючих речовин в атмосферному повітрі при викиді з свердловини. Дана модель, на відміну від існуючих, представляє собою набір трьох аналітичних залежностей, що описують розповсюдження забруднюючих речовин в просторі та часі відповідно при залповому, короткочасному та неперервному викидах. Здійснено порівняння результатів математичних обчислень з даними натурних вимірювань концентрації забруднюючих речовин, що входили до складу аварійного викиду під час фонтанування газової свердловини газоконденсатного родовища Полтавської області. Визначено, що похибка моделювання не перевищує 15% для всіх досліджуваних речовин. Це свідчить про високу адекватність розроблених моделей і можливість їх застосування для розв'язання більш широкого (в порівнянні з аналогами) класу задач, пов'язаних із контролем стану атмосферного повітря на територіях розташування газових свердловин за різних умов викидів, метеорологічних характеристик та режимів роботи бурової установки

Ключові слова: нафтогазовий комплекс, свердловина, екологічна безпека, атмосферне повітря, моделювання аварійного викиду

## **1. Вступ**

Об'єктами впливу при спорудженні та експлуатації свердловин є практично всі елементи навколишнього природного середовища (НПС). Зокрема необхідно виділити наступні: атмосферне повітря (АП), поверхневі і підземні води, ґрунтовий і рослинний покрив, біотичні комплекси, пластові поклади тощо [1–3].

Незважаючи на постійне вдосконалення нафтогазовидобувного обладнання, засобів і систем аварійної діагностики і захисту, існує можливість виникнення некерованих або погано керованих явищ і процесів. Такі факти класифікуються як аварія і становлять особливу небезпеку для біосфери і, перш за все, для населення. Можливі причини виникнення аварій досить докладно описані в існуючій літературі [4, 5].

До числа можливих аварій, що представляють особливу небезпеку, відноситься відкрите фонтанування свердловин. За умов як запаленого так і не палаючого фонтанування газової свердловини в АП у великій кількості надходять токсичні речовини. Потім ці гази внаслідок турбулентної дифузії та під дією вітру розповсюджуються по території бурової та за її межі, що створює великий ризик для НПС, здоров'я персоналу та населення прилеглих територій.

Ефективне попередження надзвичайних ситуацій (НС) при забрудненнях АП газовими викидами з фонтануючої свердловини можна умовно розділити на дві групи завдань. Першою групою є завдання оперативного прогнозу за фактом аварії, що сталася, другою – завчасний розрахунок поширення домішки в АП при фіксованих умовах [6–8]. Складання прогнозу актуального і потенційного рівня забруднюючих речовин (ЗР) з достатньою точністю має ряд труднощів. Атмосферне забруднення характеризується просторово-часовою неоднорідністю, нестаціонарністю інтенсивності викидів, а також зміною погодних умов і режиму викидів в атмосферу [9, 10].

Поширення субстанції (маси, енергії), що вивільнилася при аварії, тобто поширення аварійного впливу можна описати відповідними математичними моделями. Сучасні вимоги щодо оцінки впливу на НПС передбачають необхідність прогнозування забруднення АП в аварійних ситуаціях, але не містять по цій процедурі ніяких конкретних рекомендацій. Це обумовлює актуальність проведення даного дослідження – побудови адекватних математичних моделей просторового поширення небезпечних речовин при фонтануванні газової свердловини (ФГС). Моделі враховуватимуть атмосферні умови розсіювання та інтенсивності викиду. Такий математичний інструмент буде корисним в задачах оцінки та прогнозування рівня забруднення АП на територіях розміщення свердловин за різних критичних ситуацій.

## **2. Аналіз літературних джерел і постановка проблеми**

В наступних роботах пропонуються нові технологічні рішення для ефективного подолання фонтанування газової свердловини, а саме: в роботі [11] – новий метод заводнення газового пласта, а в роботі [12] – технологія використання підземних спрямованих вибухів. В роботі [13] представлено ГІС-аналіз результатів вимірювання концентрацій метану, етану, пропану, діоксиду вуглецю та сірководню на територіях розміщення газових свердловин під час аварійного непалаючого

фонтанування. Проте автори цих робіт не підіймають питання побудови математичних засобів моделювання для визначення розподілу в просторі та часі концентрації забруднюючих речовин, що викидаються під час такої аварії.

В роботі [14] представлено розроблені математичні моделі поширення небезпечних речовин від площинного та лінійного джерела. Запропоновані моделі дають змогу оцінити рівень впливу на приземний шар атмосфери лише при технологічних процесах промивання свердловини. Проте ці моделі не дозволяють визначати розподіл токсичних ЗР при аварійному ФГС.

В документі [15] наведено алгоритм розрахунку параметрів викидів і валових викидів шкідливих речовин від факельних установок спалювання вуглеводневих сумішей, проте не дозволяє визначити кількість викидів при непалаючому фонтануванні.

Є ряд робіт, присвячених теоретичним дослідженням атмосферної турбулентності і поширення промислових викидів. Так в [16] досліджуються турбулентний обмін в шарі припіднятої інверсії, в [17] – вплив аномальної стратифікації на початковий підйом домішок в результаті викидів техногенного джерела, а в [18] – вплив зміни швидкості вітру з висотою на розподіл техногенних домішок в приземному шарі атмосфери. Проте фізичні закономірності витікання, перенесення і розсіювання при аварійних викидах природного газу характеризуються значною складністю та істотно відрізняються від класичних викидів, наприклад з димових труб. Перш за все це об'єктивно пов'язано з нестаціонарним характером і високою швидкістю (аж до звукової) витікання газу при аваріях на свердловинах, значним впливом підстилаючої поверхні, довільної в загальному випадку просторової орієнтації викиду і т. д. Тому отримані в цих роботах результати не можуть бути використані для побудови математичних моделей забруднення АП при викидах з газової свердловини під час непалаючого фонтанування.

Використання інтегральних методів в даній задачі знайшло своє відображення в роботах [19–21]. Запропоновані цими авторами одномірні моделі струменя в ряді випадків добре відтворюють розподіл параметрів течії по осі вільних струменів. Проте вони не здатні в сукупності врахувати ряд важливих чинників, які при аварійних викидах з свердловин і газопроводів мають визначальне значення. До таких чинників можна віднести нестаціонарність, неізотермічність викиду, відмінну від повітря щільність, існування поблизу земної поверхні вираженої вертикальної неоднорідності швидкості вітру і характеристик турбулентності. Це істотним чином впливає на появу значних похибок у розрахункових значеннях приземної концентрації. Разом з тим в задачах промислової безпеки необхідною інформацією є саме поле приземних концентрацій.

В роботі [22] описано використання інженерної методики розрахунку забруднення АП, яка була розроблена в Головній геофізичній обсерваторії ім. О. І. Воейкова (СРСР, 1986 р.). Проте дана методика має суттєве обмеження оскільки дозволяє визначати розподіл концентрації забруднюючих речовин від техногенних джерел лише за нестійкого стану атмосфери. Це не дозволяє використовувати дану методику для інших метеорологічних сценаріїв, що є неприйнятним для превентивного прогнозу важких аварій, пов'язаних з непалаючим фонтануванням газової свердловини.

В роботі [23] використано методику EPA USA для оцінки ризиків для здоров'я населення від викидів токсичних речовин великими промисловими об'єктами в АП. Проте дана методика не враховує повною мірою специфіку досліджуваних аварійних викидів. Це пов'язано з тим, що її математичний апарат не враховує турбулентність струйної течії, що виникає, і процеси тепломасообміну при розповсюдженні домішок в АП. Тому даний математичний інструментарій не може бути використаний для підтримки прийняття ефективних рішень під час фонтанування газової свердловини.

Поширене використання математичних моделей гаусівського типу для вирішення задач охорони АП на територіях розміщення хімічно-небезпечних об'єктів. Так, в роботі [24] використано одновимірну модель для визначення максимальної концентрації та відстані, на якій вона виникає, в результаті викиду хімічно-небезпечного об'єкту за заданих метеорологічних умов, в [25] – модель нестационарного режиму викидів для дослідження ризику для здоров'я населення в разі вибуху на потенційно-небезпечному об'єкті, в [26] – модель МАГАТЕ для знаходження потужності джерела викиду за даними моніторингу. Проте моделі на основі функції розподілу Гауса мають ряд значних недоліків:

- не враховують локальні особливості рельєфу і непостійність в просторі та часі метеопараметрів;
- не описують джерела, що працюють обмежений час; у них використовуються дисперсійні характеристики, одержані для наземних, а не підведених джерел;
- не враховують вертикальну структуру прикордонного шару;
- використовуються лише для визначення концентрації ЗР, густина яких близька до густини повітря;
- використовуються лише для метеоситуацій, для яких швидкість вітру не менша за 1 м/с.

Зазначені недоліки значно обмежують можливості застосування цих моделей у вирішенні задач попередження надзвичайних ситуацій, пов'язаних із аварійним фонтануванням газових свердловин.

Таким чином, виконаний аналіз показав, що на сьогоднішній день відсутні математичні засоби моделювання витікання суміші газів із непалаючої фонтануючої газової свердловини при різних режимах викиду. А розроблені математичні моделі та методики, що дозволяють описати розповсюдження ЗР в АП від викидів техногенних джерел забруднення, мають значні недоліки та обмеження. Тому, для вирішення актуальних задач, пов'язаних із попередженням надзвичайних ситуацій при фонтануванні газової свердловини, виникає необхідність розробки математичних засобів, які дозволять адекватно описати як рух газової суміші по стовбуру свердловини, так і міграцію ЗР в АП за різних режимів викидів та метеорологічних сценаріїв.

### **3. Мета і завдання дослідження**

Метою дослідження є розроблення математичних моделей витікання газу із свердловини та його розповсюдження в атмосферному повітрі при аварійному фонтануванні.

Для досягнення цілі поставлено наступні задачі:

- дослідити фізичні особливості забруднення АП при ФГС;
- розробити моделі витікання суміші газів із непалаючої фонтануючої свердловини при різних режимах викиду;
- розробити математичну модель розповсюдження ЗР в АП при ФГС;
- перевірити адекватність розробленої математичної моделі.

#### **4. Матеріали побудови математичних засобів забруднення атмосферного повітря при не палаючому фонтануванні газової свердловини**

##### **4. 1. Фізичні особливості забруднення атмосферного повітря при фонтануванні газової свердловини**

Задача прогнозування рівня та розподілу забруднення АП при відкритому ФГС включає в себе два основних етапи:

- визначення (розрахунок) обсягів газових викидів, їх параметрів і складу;
- розрахунок міграції ЗР в просторі та часі в приземному шарі атмосфери.

Розглянемо фізичні особливості кожного етапу.

Фонтан – це неконтрольований викид газорідинної суміші (газів, нафти, води та інших речовин) на земну поверхню із свердловини через високий природний пластовий тиск. При цьому тиск в експлуатаційній колоні менше ніж пластовий тиск. В більшості випадків основним фактором для фонтанування є газ, що знаходиться разом з рідинною сумішшю в пласті. При експлуатації свердловини, яку пробурено до пласту з високою пластовою енергією, вільний газ з такої суміші починає виділятися лише в підйомних трубах. Цей процес починається на такій глибині, де тиск нижче тиску насичення рідинної суміші газом. За таких умов основними причинами підйому газорідинної суміші в свердловині будуть гідростатичний напор та енергія стисненого газу, яка почне проявлятися лише у верхній частині свердловини. У міру просування вгору по стовбурі свердловини бульбашки газу відчувають все менший тиск, при цьому об'єм газу збільшується і питома вага суміші рідини і газу зменшується. Це призводить до підйому рівня рідини в свердловині до гирла. Отже, фонтанування свердловин відбувається внаслідок різниці між тиском в пласті і тиском на вибої стовпа рідини.

Виникненню фонтанів сприяють тривалі зупинки і порушення циклічності буріння, невміле застосування методів ліквідації аварій [27, 28], розкриття пластів з різко відмінною літолого-фізичною характеристикою і наявністю аномально високих пластових тисків та ряд інших факторів [29].

Розсіювання в атмосфері аварійного викиду природного газу залежить від багатьох взаємопов'язаних причин і умов викиду (рис. 1).

Після того, як домішки потрапляють в АП, характер їх переміщення визначається їх власними фізичними властивостями і властивостями атмосфери, в яких знаходяться. Поширення і розсіювання аварійного викиду в АП відбувається в результаті перенесення його вітром і турбулентної дифузії, зумовленої наявністю в атмосфері безладних завихрень, які складним чином взаємодіють між собою і з поверхнею землі.

Вплив швидкості вітру на забруднення приземного шару атмосфери має складний характер. З однієї сторони наземні концентрації домішок зменшуються

із зростанням швидкості вітру, а з іншої – посилення вітру веде до зменшення початкового підйому  $\Delta H$  димішок, що сприяє збільшенню наземної концентрації.

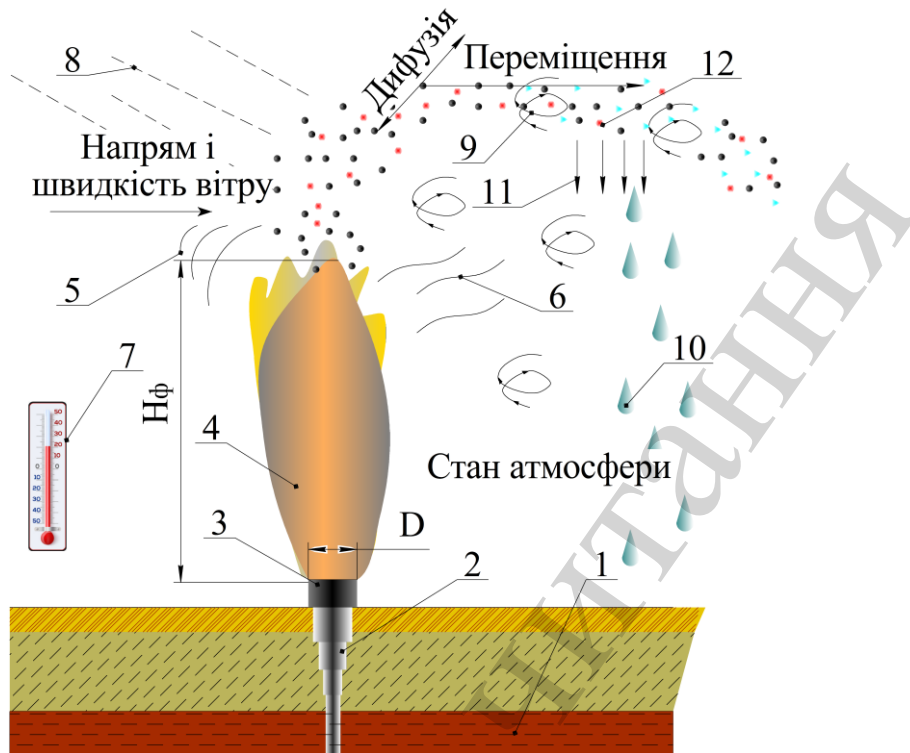


Рис. 1. Особливості розповсюдження поллютантів при аварійному ФГС: 1 – продуктивний горизонт (джерело); 2 – стовбур свердловини; 3 – вихідний отвір; 4 – форма струменя та його компонентний склад; 5 – акустичне випромінювання; 6 – теплове випромінювання (при запаленому фонтані); 7 – вертикальний температурний градієнт; 8 – сонячна радіація; 9 – турбулентні повітряні завихрення; 10 – опади; 11 – сухе осадження; 12 – утворення нових хімічних сполук;  $H_{\phi}$  – висота викиду (при запаленому факелі);  $D$  – діаметр вихідного отвору

При стійкому стані атмосфери розсіювання димішки сповільнюється і її хмара зі значною концентрацією може переноситися на велику відстань. При нестійкому стані атмосфери елементарний об'єм повітря, виведений з рівноваги, прагне продовжити свій рух. При цих умовах хмара димішки швидко розмивається [30].

Вводиться поняття ефективної висоти джерела:

$$H_{\text{еф}} = H_{\text{дж}} + \Delta H, \quad (1)$$

де  $H_{\text{дж}}$  – висота джерела викиду (факельна труба), м;  $\Delta H$  – величина підйому димішок над джерелом, м.

Для обчислення висоти підйому  $\Delta H$  (м) будемо використовувати наступну емпіричну формулу [30, 31]:

$$\Delta H = \frac{1,5W_0 R_{\text{дж}}}{u} \left( 2,5 + \frac{3,3gR_{\text{дж}} \Delta T}{T_{\text{п}} u^2} \right), \quad (2)$$

де  $W_0$  – середня швидкість виходу ЗР з газової свердловини, м/с;  $R_{\text{дж}}$  – радіус гирла свердловини, м;  $u$  – швидкість вітру на висоті флюгера 10 м, м/с;  $\Delta T$  – перегрів газів;  $T_{\text{п}}$  – температура оточуючого повітря в абсолютній шкалі;  $g=9,8 \text{ м/с}^2$  – прискорення вільного падіння.

У разі миттєвого викиду фонтанування триває кілька десятків секунд до самозаймання горючого газу або його підпалу. Вітер зносить газову хмару, що утворилася на висоті в цілому, а її розширення обумовлено турбулентною дифузиею як в напрямку вітру, так і в перпендикулярних до нього напрямках.

У разі аварійного фонтанування свердловини (безперервне джерело постійної інтенсивності) час викиду до моменту підпалу струменя складе 10–30 хв. Газ, викинутий зі свердловини, поширюється при цьому у вигляді струменя, як при стаціонарному витіканні. У разі викиду зі свердловини період різкої зміни витрати малий і невдовзі після початку фонтанування стабілізується по величині, яка визначається розмірами стовбура і характеристиками пласта.

Також, на розповсюдження домішок в атмосфері і тим самим на рівень приземної концентрації впливають тумани, опади та сонячна радіація [14, 30].

## **4. 2. Математична модель витікання суміші газів при непалаючому фонтануванні газової свердловини**

При моделюванні розглядається стаціонарне витікання з свердловини в атмосферу високодебітного вертикального круглого струменя фонтануючого щільного (холодного) газу,  $\rho_0 > \rho_a$  ( $T_0 < T_a$ ), де  $\rho_0$  та  $\rho_a$  – густина газу на зрізі свердловини і повітря, відповідно;  $T_0$  та  $T_a$  – температура газу на виході і НПС, відповідно. При цьому виходимо з умов, що газ хімічно стабільний, домішка пасивна і не змінює густини повітряної суміші, поверхня землі плоска, з однорідною шорсткістю і непроникна для речовини.

Існує визначаючий напрям викиду, поширення домішки вздовж якого має переважно конвективний характер. Поперек струменю розсіювання носить дифузійний характер. Приймається твердження про подібність профілів поперечного розподілу основних параметрів струменя (швидкості, температури і концентрації домішки).

### **4. 2. 1. Математична модель усталеного витікання суміші газів з свердловини**

Для побудови даної моделі приймемо, що по свердловині і пласту рухається сталий потік суміші газів. Масова витрата через будь-який поперечний переріз свердловини однакова:

$$\rho \cdot Q = \text{const}, \quad (3)$$

де  $Q$  – об'ємна витрата через переріз, кг/с;  $\rho$  – середня густина суміші газів в перерізі, кг/м<sup>3</sup>.

Припускається, що в межах свердловини канал, по якому рухається суміш газів, складений з  $N$  прямолінійних рівнопрохідних секцій, кожна з яких має поперечний переріз кільцевої форми. Таким чином, геометрія каналу визначається набором наступних параметрів:

$$l_i, d_{\text{зов}_i}, d_{\text{вн}_i}, \alpha_{z_i}, i=1, 2, 3, \dots, N, \quad (4)$$

де  $l_i$  – довжина секції, м;  $d_{\text{зов}_i}, d_{\text{вн}_i}$  – відповідно зовнішній та внутрішній діаметр кільцевого перерізу, м;  $\alpha_{z_i}$  – zenітний кут (кут між напрямком осі секції і вертикаллю), град.

У межах секції справедливо рівняння кількості руху:

$$\frac{d(\rho W^2)}{dl} + \frac{dP}{dl} = - \frac{\lambda_i \rho W |W|}{2d_i} + \rho g \cos \alpha_{z_i}, \quad (5)$$

де  $d_i$  – гідравлічний діаметр, який обчислюється за формулою

$$d_i = d_{\text{зов}_i} - d_{\text{вн}_i}, \quad (6)$$

де  $l$  – відстань від гирла, м;  $W$  – швидкість суміші газів, м/с (при фонтануванні швидкість у виразі (5) від'ємна);  $P$  – тиск суміші газів, Па;  $\lambda_i$  – коефіцієнт гідравлічного опору  $i$ -ої секції, б/р.

Приймаємо, що в місцях з'єднання секцій тиск змінюється неперервним чином (втрати, викликані зміною поперечного перерізу і напрямку потоку, не враховуються).

Рівняння стану для суміші газів запишемо в наступному вигляді:

$$\rho = \rho_n \cdot \frac{T_n}{T} \cdot \frac{1}{Z} \cdot \frac{P}{P_n}, \quad (7)$$

де  $\rho_n, T_n, P_n$  – густина, температура та тиск суміші газів за нормальних умов.

Густина газової суміші при нормальних умовах за об'ємними частками визначається за формулою:

$$\rho_n = 0,01 \sum_{i=1}^n c_i \rho_{n,i}, \quad (8)$$

де  $c_i$  – відсотковий вміст  $i$ -го газу у суміші з  $n$  газів, що викидаються;  $\rho_{n,i}$  – густина  $i$ -го газу в суміші за нормальних умов, кг/м<sup>3</sup>.



Середнє значення коефіцієнту стисливості суміші газів  $Z$  визначається за формулою:

$$Z = 1 - 0,0241 \cdot \frac{P(P_0)}{\Theta}, \quad (9)$$

де  $P(P_0) = \frac{P_0}{P_{\text{пк}}}$ ;  $\Theta = 1 - 1,68T + 0,78T^2 + 0,0107T^3$ ;  $T = \frac{T_0}{T_{\text{пк}}}$ ;  $P_0$  – тиск на гирлі свердловини, МПа;  $T_0$  – середня по стовбуру свердловини температура суміші газів, К.

Псевдокритичний тиск  $P_{\text{пк}}$ , МПа, та температура  $T_{\text{пк}}$ , К, суміші газів, що викидаються, визначаються за формулами:

$$P_{\text{пк}} = 0,01 \sum_{i=1}^n c_i P_{ki}, \quad (10)$$

$$T_{\text{пк}} = 0,01 \sum_{i=1}^n c_i T_{ki}, \quad (11)$$

де  $P_{ki}$  та  $T_{ki}$  – відповідно критичний тиск, МПа, та критична температура, К,  $i$ -го газу в суміші.

Втрати тиску в пласті при стаціонарній фільтрації описуються рівнянням:

$$P_z^2 = P_{\text{пл}}^2 - aQ_{\text{н}} - bQ_{\text{н}}^2, \quad (12)$$

де  $P_z$  – тиск в свердловині навпроти інтервалу, що працює;  $a$  та  $b$  – відповідно коефіцієнти лінійного та квадратичного фільтраційного опору свердловини,  $\text{кг} \cdot \text{см}^2$ ;  $P_{\text{пл}}$  – пластовий тиск.

Рівняння (12) можна розглядати як граничну умову для системи (3)–(5). Умова на гирлі має вигляд:

$$\begin{aligned} W_{\text{г}} &= C \quad \text{при} \quad P_{\text{г}} > P_a, \\ W_{\text{г}} &< C \quad \text{при} \quad P_{\text{г}} = P_a, \end{aligned} \quad (13)$$

де  $P_{\text{г}}$ ,  $W_{\text{г}}$ ,  $C$  – тиск, швидкість газу і швидкість звуку на гирлі;  $P_a$  – атмосферний тиск (розглядається відкритий фонтан).

Задача розв'язується в припущенні сталості температури суміші газів, що рухаються по свердловині, і коефіцієнта стисливості:

$$\begin{aligned} T &= \text{const}, \\ Z &= \text{const}. \end{aligned} \quad (14)$$

Задача полягає у визначенні дебїту фонтану при заданих параметрах пласта (пластовий тиск, коефіцієнти фільтраційного опору), геометрії стовбура і параметрах рівняння стану (3), (14). В якості середніх значень в (14) будемо використовувати середньоарифметичні значення температури і коефіцієнта стисливості для пластових і гирлових умов. Розв'язання рівняння (5) здійснюється методом поділу відрізка навпіл. В якості нижньої межі кореня приймається нульове значення дебїту. Верхня межа визначається шляхом розрахунку забійного тиску для декількох послідовно зростаючих значень  $Q_n$ .

Після визначення дебїту фонтану  $Q_m$  за даних внутрішніх та зовнішніх умов відносно свердловини за допомогою наступного виразу визначаємо масову витрату суміші газів  $Q'_m$ , кг/с:

$$Q'_m = Q_m \rho_{\text{сум}}, \quad (15)$$

де  $\rho_{\text{сум}}$  – густина суміші газових компонентів, що викидаються, на рівні гирла свердловини, кг/м<sup>3</sup>.

Величина  $\rho_{\text{сум}}$  визначається з рівняння (7) залежно від умов на гирлі свердловини.

І кінцевим результатом моделювання на даному етапі є визначення масової витрати  $i$ -го газу в суміші  $M'_i$ , кг/с:

$$M'_i = Q'_m c_i. \quad (16)$$

Таким чином, побудовано математичну модель, яка описує неперевніе витікання газової суміші при аварійному фонтануванні свердловини і дозволяє визначати масову витрату кожної компоненти суміші, що викидається.

#### 4. 2. 2. Математична модель залпового витікання суміші газів зі свердловини

Передбачається, що свердловина вертикальна і канал, по якому відбувається викид, має постійний поперечний переріз. Нестационарна течія газу описується системою рівнянь, що виражають закони збереження маси і кількості руху:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho W)}{\partial l} = 0, \quad (17)$$

$$\rho \frac{dW}{dt} + \frac{\partial P}{\partial l} + g\rho \left( \frac{|W|W}{W_{gid}^2} - 1 \right) = 0, \quad (18)$$

де

$$W_{gid} = \sqrt{\frac{2gD_{gid}}{\lambda}}. \quad (19)$$

Рівняння стану газу запишемо у вигляді:

$$P = \rho Z_{cp} RT_{cp}, \quad (20)$$

де

$$- \frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + W \frac{\partial}{\partial l};$$

–  $t$  – час;

–  $l$  – довжина вздовж вісі стовбура;

–  $g$  – прискорення вільного падіння;

–  $P$ ,  $W$ ,  $\rho$  – тиск, швидкість і густина газу;

–  $\lambda$  – коефіцієнт гідравлічного опору (приймається сталим);

–  $D_{gid}$  – гідравлічний діаметр каналу;

–  $Z_{cp}$  та  $T_{cp}$  – середні по стовбуру значення коефіцієнта стисливості та температури газу.

У початковий момент гирло свердловини закрито, і розподіл тиску  $P_0$  в нерухомому стовпі газу описується рівнянням

$$- \frac{\partial P_0}{\partial l} + g\rho = 0. \quad (21)$$

На забої тиск в свердловині співпадає з пластовим тиском:

$$P_0(l_b) = P_{пл}, \quad (22)$$

де  $l_b$  – координата покрівлі інтервалу, на якому відбувається прояв;  $P_{пл}$  – пластовий тиск в місцях розташування свердловин.

Нехай в момент  $t = 0$  відбувається миттєва розгерметизація гирла. Швидкість у вихідному перерізі буде дорівнювати місцевій швидкості звуку, а поточний дебіт обчислюється за формулою

$$Q_h = C_D W_s F_h \rho_h, \quad (23)$$

де  $Q_h$  – дебіт фонтану;  $W_s$  – місцева швидкість звуку;  $F_h$  – площа вихідного перерізу;  $\rho_h$  – густина флюїду у вихідному перерізі;  $C_D$  – коефіцієнт витрати, що залежить від форми вихідного перерізу.

Починаючи з цього моменту, вниз по стовпу газу буде пересуватися хвиля розрідження. Дійшовши до забою, хвиля, частково відбившись, перейде в пласт, де сформується зростаюча в часі депресійна воронка. Для розрахунку викиду застосовується метод зміни стаціонарних станів, відповідно до якого

область течії поділяється на дві ділянки. На нижній ділянці знаходиться стовп газу в стані спокою, а на верхньому – рухається стаціонарний потік.

Таким чином, в пригирловій частині стовбура виконуються рівняння

$$\rho FW = Q_h(t) = \text{const}, \quad (24)$$

$$-\frac{dP}{dl} - \frac{d(\rho W^2)}{dl} + g\rho \left(1 + \frac{W^2}{W_{gid}^2}\right) = 0. \quad (25)$$

На рухомій межі виконується умова:

$$P(l_f, t) = P_0(l_f), \quad (26)$$

де  $l_f$  – поточне положення фронту.

Знаючи розподіл тиску по стовбуру, можна визначити масу газу, що знаходиться в момент  $t$  в свердловині. Зі сказаного випливає, що маса повністю визначається положенням фронту:  $M(t) = M(l_f)$ . З умови матеріального балансу, застосованого до всього стовбура, випливає рівняння переміщення фронту

$$M' \cdot \frac{dl_f}{dt} = Q_h. \quad (27)$$

Після того, як хвиля досягла вибою, приходить в рух флюїд в пласті. Припускаючи течію симетричною відносно вісі свердловини, позначимо через  $R_f$  радіус межі (радіус депресійної воронки), яка відділяє область нерухомого флюїду від присвердловинної області, в якій потік є стаціонарним і його дебіт дорівнює миттєвому дебіту фонтану. Для обчислення  $R_f$  використовується рівняння аналогічне (27), в якому під  $M$  розуміється маса газу в стовбурі і круговій області пласта, радіус якої  $R_0$  обраний так, що на даному інтервалі часу  $R_f < R_0$ . Щоб визначити  $M(R_f)$ , розглядається задача про стаціонарну течію в системі свердловина-пласт, що задовольняє умову на гирлі (23) і умову на рухомому контурі

$$P(R_f, t) = P_{пл}. \quad (28)$$

Крім того, виконуються умови сполучення – неперервна зміна тиску і масової витрати при переході від пласта до свердловини.

Для наближеного розрахунку течії в пласті використаний відомий результат теорії фільтрації – при постійному дебіті свердловини переміщення радіусу  $R_f$  в методі зміни стаціонарних станів описується співвідношенням

$$R_f(t) \approx R_w + 2\sqrt{\eta t}, \quad (29)$$

де  $\eta$  – п'єзопровідність, яка визначається в разі газового пласта виразом

$$\eta = \frac{P_{\text{пл}} k}{m \mu}, \quad (30)$$

де  $k$  – проникність пласта в околиці свердловини, дарсі;  $m$  – середня пористість пласта в околиці свердловини, б/р;  $\mu$  – в'язкість газу в пластових умовах, сП.

#### 4. 3. Математична модель розповсюдження забруднюючих речовин в атмосферному повітрі при фонтануванні газової свердловини

Для побудови математичної моделі розповсюдження ЗР в АП при викиді з газової свердловини приймалися наступні твердження:

- 1) середовище є суцільним та нестисливим;
- 2) атмосферна турбулентність є ізотропною та неоднорідною;
- 3) при перенесенні домішок відбувається лише турбулентна дифузія градієнтного типу, молекулярною дифузією нехтується;
- 4) ЗР, що викидаються в атмосферу, розглядаються як «пасивні домішки», тобто такі, які не змінюють аеродинаміки того повітряного потоку, в який потрапляють;
- 5) рух повітря є стаціонарним;
- 6) в атмосферу надходить суміш газів, швидкість осадження яких досить мала, тобто нею нехтується.

З врахуванням вищезазначених тверджень та припущень було знайдено функцію  $q(t, x, y, z)$ , яка визначає концентрацію ЗР в просторі та часі за умов залпового викиду в момент часу  $t=0$  домішки масою  $M$  точковим джерелом, яке розташоване в точці  $(0, 0, H_{\text{еф}})$ . Для цього розв'язувалось наступне емпіричне рівняння турбулентної дифузії з відповідними початковими та граничними умовами [30]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial q}{\partial t} + u \frac{\partial q}{\partial x} + v \frac{\partial q}{\partial y} + w \frac{\partial q}{\partial z} + \lambda q = \\ = K_x \frac{\partial^2 q}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 q}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 q}{\partial z^2} + \\ + M \delta(t) \delta(x) \delta(y) \delta(z - H_{\text{еф}}), \end{aligned} \quad (31)$$

початкові умови:

$$uq = M \delta(x) \delta(y) \delta(z - H_{\text{еф}}) \text{ при } t=0;$$

граничні умови:

$$q \rightarrow 0 \text{ при } x^2 + y^2 + z^2 \rightarrow \infty$$

та

$$K_z \frac{\partial q}{\partial z} + wq + \beta q = 0 \text{ при } z=z_0,$$

- $u, v, w$  – координати вектора швидкості вітру, м/с;
- $K_x, K_y, K_z$  – коефіцієнти турбулентної дифузії, м<sup>2</sup>/с;
- $\lambda$  – параметр, що враховує зміну концентрації ЗР за рахунок таких процесів, як хімічна трансформація, вимивання опадами, поглинання підстилаючою поверхнею тощо, с<sup>-1</sup>;
- $z_0$  – параметр, який визначає шорсткість підстилаючої поверхні, м;
- $\beta$  – параметр, який характеризує взаємодію ЗР з підстилаючою поверхнею (відбиття або поглинання), м/с;
- $t$  – час розповсюдження ЗР, с;
- $\delta$  – дельта-функція Дірака.

Ідея розв'язання рівняння (31) полягала у зменшенні кількості обчислень шляхом розщеплення трьохвимірної задачі на послідовність одновимірних задач таким чином, щоб зберігалась і структура розв'язку і основні його властивості [32]. В цьому випадку, за рахунок однорідних граничних умов, фундаментальний розв'язок просторового рівняння було представлено у вигляді комбінації (склеювання) фундаментальних розв'язків відповідних задач

$$\begin{aligned} \frac{\partial f(t, x_i)}{\partial t} &= K_{x_i}(t) \frac{\partial^2 f(t, x_i)}{\partial x_i^2} - \\ &- u_i(t) \frac{\partial f(t, x_i)}{\partial x_i} + \delta(t - t_0) \delta(x_i - x_0), \end{aligned} \quad f(t_0, x_i) = 0 \quad (32)$$

по кожній просторовій координаті  $i=1, 2, 3$ .

Доданок  $\lambda(t) \cdot q(t)$  рівняння, який характеризує втрату домішки в процесі її дифузії, було виключено з розв'язку заміною функції

$$q(t, x, y, z) = e^{-\int_{t_0}^t \lambda(t) dt} \cdot f(t, x). \quad (33)$$

Для розв'язання рівнянь (32) було здійснено зміну системи координат:

$$\xi = \int_{t_0}^t K_x(t) dt = \eta(t), \quad \vartheta = x - \int_{t_0}^t u(t) dt, \quad (34)$$

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \frac{\partial f}{\partial \xi} \cdot K_x(t) - \frac{\partial f}{\partial \vartheta} u(t); \quad \frac{\partial f}{\partial x} = \frac{\partial f}{\partial \vartheta}; \quad \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 f}{\partial \vartheta^2}, \quad (35)$$

та, виконавши підстановку з врахуванням заміни функції, було отримано наступне нелінійне диференціальне рівняння в частинних похідних

$$\frac{\partial f'}{\partial \xi} = \frac{\partial^2 f'}{\partial \vartheta^2} + \frac{e^{\int_{t_0}^{\eta^{-1}(\xi)} \lambda(t) dt}}{K_x(\eta^{-1}(\xi))} \delta(\eta^{-1}(\xi)) \delta\left(\vartheta - x_0 + \int_{t_0}^{\eta^{-1}(\xi)} u(t) dt\right). \quad (36)$$

Для його розв'язання застосовується метод перетворення Фур'є [32] по змінній  $\vartheta$  та здійснювалась обернена заміна для функції та координат. Для остаточного отримання розв'язку рівняння (31) було здійснено склеювання [32] отриманих розв'язків рівнянь (32).

Для знаходження функції концентрації  $q(t, x, y, z)$  за умов короткочасного викиду ЗР тривалістю  $t_1$  було виконано процедуру згортки [32] розв'язку рівняння (31) по  $t$ . Для знаходження функції, що описує просторовий розподіл концентрації при неперервних викидах інтенсивністю  $M$  від точкового джерела, в моделі для джерела короткочасної дії спочатку було здійснено заміну  $t_1$  на  $t$ . Після того було взято границю від правої частини отриманої рівності, спрямувавши  $t$  до нескінченності.

При розв'язанні рівняння (31) вісь  $Ox$  розташовувалась вздовж напрямку вітру, що не завжди буває зручним. При розв'язуванні практичних задач, систему координат розташовують, як правило, таким чином, щоб вісь абсцис була напрямлена в східному напрямку, тобто основна система координат  $Oxyz$  є фіксованою. За таких умов напрямок вітру може відрізнятись від напрямку вісі  $Ox$  і утворювати з нею певний кут  $\alpha$ . Для використання моделей за таких умов потрібно здійснювати моделювання в системі координат  $Ox_1y_1z$ , де вісь  $Ox_1$  напрямлена вздовж напрямку вітру, а потім отримані результати перенести в систему координат  $Oxyz$  за допомогою формул переходу:

$$\begin{cases} x_1 = x \cos \alpha + y \sin \alpha, \\ y_1 = -x \sin \alpha + y \cos \alpha. \end{cases} \quad (37)$$

Після всіх математичних перетворень аналітичні залежності, що утворюють математичну модель забруднення атмосфери за нестационарних та стаціонарних умов викидів від ФГС, отримали вигляд:

для джерела миттєвого викиду:

$$q(t, x, y, z) = \frac{Me}{8\pi\sqrt{\pi K^2 K_z} t^3} \times \left( e^{-\frac{(z-H_{\text{эф}})^2}{4K_z t}} + e^{-\frac{(z+H_{\text{эф}}-2z_0)^2}{4K_z t}} \right) \cdot e^{-\frac{\lambda(x \cos \alpha + y \sin \alpha)}{u_{H_{\text{эф}}}}}; \quad (38)$$

для джерела короткочасного викиду тривалістю  $t_1$ :

$$q(t, x, y, z) = \frac{Me}{8\pi\sqrt{\pi K^2 K_z}} \cdot \int_0^{t_1} e^{-\frac{\lambda(x \cos \alpha + y \sin \alpha)}{u_{H_{\text{эф}}}}} \cdot \frac{e^{-\frac{(x \cos \alpha + y \sin \alpha - u_{H_{\text{эф}}}(t-\tau))^2 + (-x \sin \alpha + y \cos \alpha)^2}{4K(t-\tau)}}}{\sqrt{(t-\tau)^3}} \times \left( e^{-\frac{(z-H_{\text{эф}})^2}{4K_z(t-\tau)}} + e^{-\frac{(z+H_{\text{эф}}-2z_0)^2}{4K_z(t-\tau)}} \right) d\tau; \quad (39)$$

для джерела неперервного викиду:

$$q(x, y, z) = \frac{Me}{4\pi K \sqrt{K_z}} \cdot \left( \frac{e^{-\frac{1}{2}\sqrt{\frac{x^2+y^2}{K} + \frac{(z-H_{\text{эф}})^2}{K_z}} \cdot \sqrt{\frac{u_{H_{\text{эф}}}^2}{K}}}}{\sqrt{\frac{x^2+y^2}{K} + \frac{(z-H_{\text{эф}})^2}{K_z}}} + \frac{e^{-\frac{1}{2}\sqrt{\frac{x^2+y^2}{K} + \frac{(z+H_{\text{эф}}-2z_0)^2}{K_z}} \cdot \sqrt{\frac{u_{H_{\text{эф}}}^2}{K}}}}{\sqrt{\frac{x^2+y^2}{K} + \frac{(z+H_{\text{эф}}-2z_0)^2}{K_z}}} \right) \cdot e^{-\frac{\lambda(x \cos \alpha + y \sin \alpha)}{u_{H_{\text{эф}}}}}. \quad (40)$$

де  $u_{H_{\text{эф}}}$  – швидкість вітру на ефективній висоті джерела викидів, м/с;  $w_g$  – швидкість гравітаційного осадження для важких домішок, м/с. При побудові моделі приймалось, що  $K_x = K_y = K$ .

В аналітичній залежності (40) під  $M$  розуміється інтенсивність викидів в г/с.

Швидкість вітру на ефективній висоті джерела викидів визначається за формулою [30]:



$$u_{H_{\text{эф}}} = u(10) \cdot \frac{H_{\text{эф}}^{\varepsilon} - z_0^{\varepsilon}}{10^{\varepsilon} - z_0^{\varepsilon}}, \quad (41)$$

де  $u(10)$  – швидкість вітру на висоті 10 м, м/с;  $\varepsilon$  – безрозмірний параметр, який залежить від категорії стійкості атмосфери.

Перевірка адекватності розроблених математичних моделей здійснюватиметься шляхом порівняння результатів моделювання з даними натурних вимірювань концентрації токсичних речовин, що входять до складу аварійного викиду під час ФГС однієї з свердловин на газоконденсатному родовищі Полтавської області. НС виникла 2015 р. на законсервованій свердловині через розгерметизацію під час ремонтних робіт. Фонтан суміші газів та конденсату бив декілька днів. Було проведено вимірювання концентрації ЗР на території розміщення свердловини.

Вхідними даними для моделювання є:

– *параметри свердловини*: глибина – 5471 м; перша секція: довжина – 1526 м; зовнішній та внутрішній діаметр кільцевого перерізу – 0,168 м та 0,14 м відповідно; друга секція: довжина – 3550 м; зовнішній та внутрішній діаметр кільцевого перерізу – 0,245 м та 0,168 м відповідно; третя секція: довжина – 395 м; зовнішній та внутрішній діаметр кільцевого перерізу – 0,351 м та 0,245 м відповідно; zenітний кут всіх секцій – 0°; висота факельної труби 5 м; пластовий тиск 37,3 МПа; тиск газу на гирлі труби 16,1 МПа; коефіцієнт гідравлічного опору – 0,08; середнє значення коефіцієнта стисливості – 1; коефіцієнт лінійного фільтраційного опору свердловини – 2 кг·см<sup>2</sup>; коефіцієнт квадратичного фільтраційного опору свердловини – 0,001 кг·см<sup>2</sup>; проникність пласта в околиці свердловини – 0,1 дарсі; середня пористість пласта в околиці свердловини – 0,12;

– *вміст та параметри газової суміші, що викидається*: відповідали наведеним в табл. 1;

Таблиця 1

Дані газової суміші, що викидається при фонтануванні

Компоненти	Відсотковий вміст, % об.	Молекулярна маса, кг/моль	Густина, кг/м <sup>3</sup>	Псевдокритичний тиск, МПа	Псевдокритична температура, К
Метан	52,885	16,041	0,717	4,640	190,66
Етан	2,541	30,07	1,356	4,884	305,46
Пропан	1,068	44,097	2,019	4,255	369,90
Бутан	0,687	58,124	2,703	3,799	425,20
Пентан+вищі	3,611	72,151	3,457	3,373	469,50
Азот	0,042	28,016	1,250	3,394	126,20
Діоксид вуглецю	11,896	44,011	1,977	7,386	304,26
Сірководень	27,27	34,082	1,541	9,007	373,60

– *метеорологічні параметри*: температура повітря – 289 К; атмосферний тиск – 0,1 МПа; швидкість вітру – 3 м/с; напрямок вітру – південно-західний; стан атмосфери – нейтральний; коефіцієнти турбулентної дифузії: горизонтальні – 75 м<sup>2</sup>/с, вертикальний – 15 м<sup>2</sup>/с; опади відсутні; вологість – 75 %;

– *параметри прилеглої території*: рівнинна земна поверхня; шорсткість підстилаючої поверхні – 0,07 м.

Для перевірки адекватності розроблених математичних моделей здійснювалось моделювання розподілу концентрації всіх речовин (табл. 1) в програмному середовищі Matlab 7. Як приклад, на рис. 2 показано результат моделювання розподілу метану в приземному шарі атмосфери на висоті 1,5 м від земної поверхні.

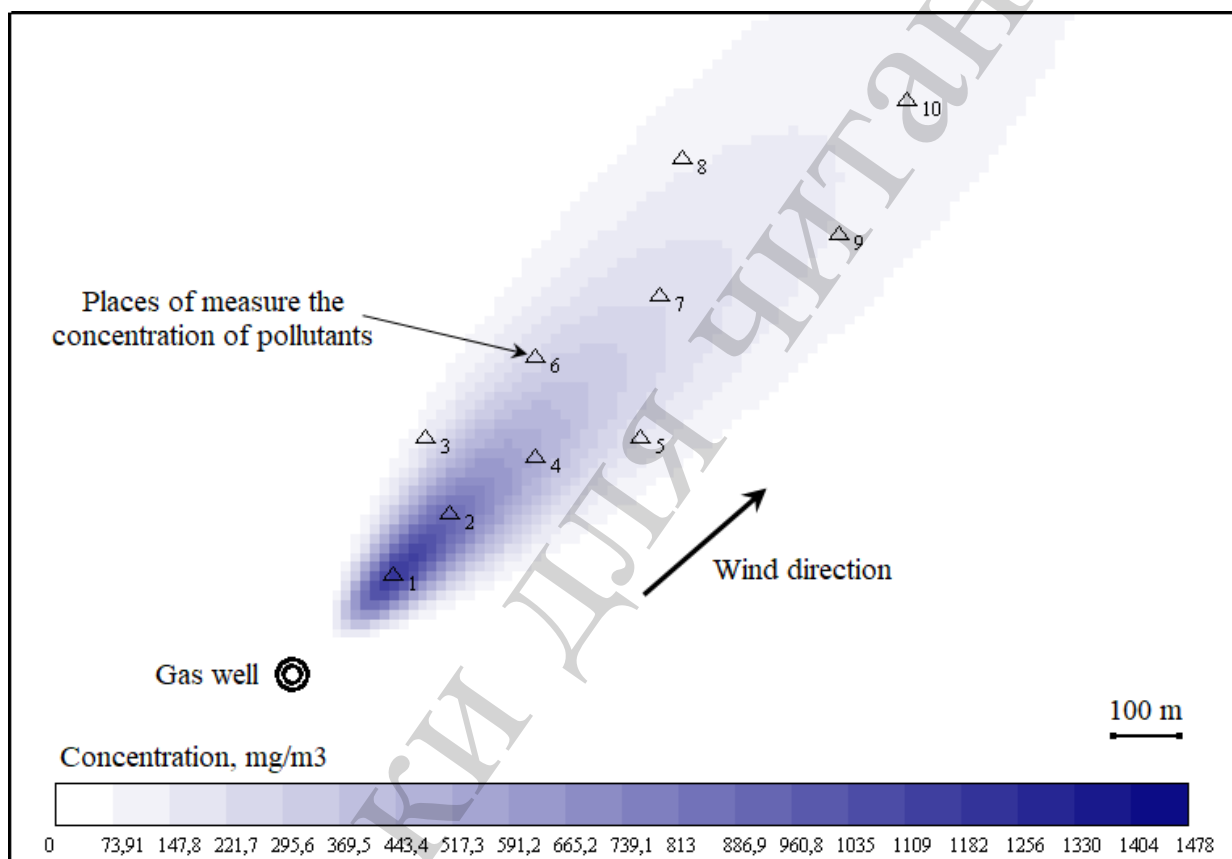


Рис. 2. Візуалізація результату моделювання розподілу метану в АП в результаті аварійного фонтанування досліджуваної газової свердловини

На рис. 2 також відзначені місця, де здійснювались натурні вимірювання концентрації газових домішок співробітниками служби аварійного реагування.

В табл. 2, як приклад, наведено результати порівняння даних моделювання та вимірювання для метану та сірководню.

Аналогічні порівняння отримано і для інших компонент викиду.

Перше, що необхідно відмітити, за таких умов фонтанування досліджуваної свердловини у приземному шарі атмосфери максимальні рівні концентрацій всіх речовин перевищували відповідні гранично допустимі концентрації максимально разові у 4–5 разів. Це говорить про значний ризик для здоров'я пер-

соналу свердловини та населення прилеглих територій при вдиханні повітря під час таких аварійних ситуацій.

І, по-друге, за результатами порівняння встановлено, що максимальна відносна похибка моделювання не перевищувала 15 %. Це є абсолютно прийнятним для такого класу задач. Результат свідчить про високу адекватність розроблених математичних моделей витікання газу та його розповсюдження в АП в результаті непалаючого ФГС.

Таблиця 2

Порівняння результатів моделювання з даними натурних вимірювань

№	Метан			Сірководень		
	$C_{\text{вим}}, \text{мг/м}^3$	$C_{\text{мод}}, \text{мг/м}^3$	$\delta, \%$	$C_{\text{вим}}, \text{мг/м}^3$	$C_{\text{мод}}, \text{мг/м}^3$	$\delta, \%$
1	1520	1478	2,8	0,0324	0,031	4,5
2	990	1066	7,1	0,0211	0,0198	6,6
3	150	137	9,5	0,0032	0,0031	3,2
4	700	626	11,8	0,0149	0,0175	14,9
5	250	231	8,2	0,0053	0,0054	1,9
6	330	329	0,3	0,007	0,0064	9,4
7	270	281	3,9	0,0057	0,0065	12,3
8	112	130	14,5	0,0023	0,0024	4,2
9	130	136	4,4	0,0027	0,003	10,0
10	110	119	7,6	0,0023	0,0021	9,5

Примітка:  $C_{\text{вим}}$ ,  $C_{\text{мод}}$  – концентрація речовини за даними натурних вимірювань та моделювання відповідно;  $\delta$  – відносна похибка моделювання.

## 5. Обговорення отриманих результатів побудови математичних моделей забруднення атмосферного повітря непалаючим фонтаном газової свердловини

Розроблені математичні засоби є ефективним інструментом вирішення задач попередження НС при непалаючому ФГС. Математична модель усталеного витікання суміші газів із свердловини (п. 4. 2. 1) дозволяє визначати потужність викиду по кожній компоненті газової суміші при стаціонарному режимі аварійного фонтанування, а модель залпового витікання суміші газів (п. 4. 2. 2) – масу викиду при нестационарному режимі виходу токсичних газів з гирла свердловини. Дані моделі представлені у вигляді набору відповідних алгебраїчних та диференціальних рівнянь, які описують рух газу по свердловині. Моделі враховують всі основні фізичні фактори впливу на переміщення газу по стовбуру свердловини. Для їх використання необхідно мати дані про газодинамічні та геометричні характеристики пласту та свердловини. Ці дані зазначаються у робочому проекті та паспорті свердловини.

Математичні моделі розповсюдження ЗР в АП отримано в аналітичному вигляді, що значно спрощує їх реалізацію та використання. Дані моделі дозволяють визначати розподіл домішок в просторі та часі на прилеглий до свердловини території за умов залпового фонтанування – модель (38), короткочасного

фонтанування – модель (39) та неперервного фонтанування – модель (40). Вхідними даними цих моделей є маса (нестационарний режим фонтанування) чи інтенсивність (стаціонарний режим фонтанування) викиду, параметри джерела та умов викиду, параметри ЗР та метеорологічної обстановки.

Розроблені математичні моделі мають значні переваги перед існуючими аналогами – моделями та методичними рекомендаціями на базі гаусівського розподілу. Так, вони враховують особливість підстилаючої поверхні та взаємодії домішок з навколишнім середовищем (вимивання опадами, хімічна трансформація, поглинання підстилаючою поверхнею), вертикальну структуру прикордонного шару. Також можуть використовуватись для визначення концентрації будь яких газових ЗР з різною густиною. До того ж вони дозволяють визначати розподіл концентрації ЗР за будь яких режимів викидів та метеорологічних сценаріїв. Це дозволяє розв'язувати більш широкий клас задач, пов'язаних із контролем стану АП на територіях знаходження газових свердловин.

Для отримання результатів застосування даних моделей необхідно використовувати спеціалізоване програмне забезпечення, яке дозволяє розв'язувати звичайні диференціальні рівняння та у часткових похідних з відповідними початковими та граничними умовами.

На даному етапі розроблені математичні моделі реалізовано в програмному середовищі Matlab 7, що дозволяє швидко отримувати результати моделювання за вхідними даними. Перевірка адекватності розроблених моделей за даними реального аварійного фонтанування однієї з газових свердловин Полтавської області показала їх високу точність: похибка моделювання не перевищувала 15 % за всіма компонентами газової суміші.

Варто відзначити, що розроблені авторами моделі не враховують рельєф місцевості, і тому висока точність моделювання буде забезпечуватись лише в умовах рівнинної місцевості до відстаней 30 км. Із ускладненням рельєфу і збільшенням відстані від джерела викиду точність моделювання буде зменшуватись. Також, очевидно, для збільшення точності моделювання потрібно забезпечувати високу точність вхідних даних.

В окремих випадках умови аварійного фонтанування не дозволяють зробити виміри в необхідному обсязі. Так, при фонтануванні інтенсивність потоку флюїду, що викидається, може бути змінною в часі. Якісний склад викидів – непередбачуваним та не стабільним: рідина, газо-рідинна суміш та газ. Тому на практиці доводиться використовувати деякі нестандартні і досить наближені методи, а також залучати дані про особливості буріння аварійної свердловини, обставини виникнення газопрояву і його переходу в некерований фонтан. Враховуючи складність натурних досліджень в реальних умовах, доречно розробити фізичну модель, використовуючи ежекційні системи [31], що дозволить експериментально дослідити можливі сценарії формування струменя потоку флюїду із свердловини та максимально наблизити їх до реальних умов.

Розроблені моделі можуть бути використані для вирішення завдання оперативного прогнозу за фактом аварії, що сталася, і завчасного розрахунку поширення домішки в атмосфері при фіксованих умовах. Такий підхід може бути корисний як при комплексному проектуванні нових свердловин, так і при плануванні захо-

дів безпеки на існуючих, зокрема для оцінки максимально можливих концентрацій при запланованих викидах. Прикладом може бути продування свердловини, коли необхідно визначити, чи будуть перевищені граничнодопустимі концентрації токсичних компонент при заданих атмосферних умовах розсіювання на межі санітарно-захисної зони бурової і прилеглих населених пунктах [1, 2, 8].

Подальші дослідження спрямовуватимуться на розробку спеціалізованого програмно-моделюючого комплексу, який буде ефективним інструментом підтримки прийняття рішень при управлінні екологічною безпекою АП на територіях розміщення газових свердловин. До його складу будуть входити різні функціональні модулі, використання яких дозволить будувати електронні карти гіпотетичного та фактичного забруднення під час аварійного ФГС, здійснювати аналіз даних та оцінювати ризики для здоров'я персоналу та населення прилеглих територій тощо [33].

## **7. Висновки**

1. Виконане дослідження фізичних особливостей забруднення атмосферного повітря при непалаючому фонтануванні газової свердловини дозволило встановити наступне. Основними параметрами, які визначають масу (інтенсивність) викиду компонентів газової суміші є:

- тиск та температура в свердловині;
- гідравлічний та фільтраційний опір свердловини;
- атмосферний тиск;
- температура зовнішнього повітря;
- геометрія свердловини;
- пластові характеристики в районі розташування свердловини (проникність, пористість та товщина пласту, тиск, в'язкість газу в пластових умовах);
- відсотковий вміст компонентів в газовій суміші.

Основними параметрами, які визначають розподіл концентрації забруднюючих речовин в просторі та часі є:

- параметри викиду (тривалість, потужність, температура, швидкість виходу домішок з свердловини, висота та радіус гирла джерела);
- метеорологічні характеристики (швидкість та напрямок вітру, температурний градієнт з висотою, коефіцієнти турбулентної дифузії, температура повітря);
- параметри взаємодії домішок з навколишнім середовищем (опадками, підстилаючою поверхнею, іншими домішками);
- шорсткість підстилаючої поверхні;
- час розповсюдження та швидкість осадження домішок (для важких домішок).

2. Розроблено математичні моделі усталеного та залпового витікання суміші газів з свердловини у вигляді диференціальних рівнянь з відповідними початковими та граничними умовами. Дані моделі враховують всі основні фактори, що впливають на інтенсивність витікання газової суміші при аварійному фонтануванні газової свердловини.

3. Розроблено математичну модель розсіювання забруднюючих домішок в атмосферному повітрі, яка на відміну від існуючих, враховує всі основні факто-

ри впливу на даний процес. Дана модель дозволяє визначати розподіл концентрації в просторі та часі за стаціонарних та нестаціонарних умов викиду та різних метеорологічних сценаріїв. Це дасть можливість ефективно розв'язувати задачі моніторингу атмосферного повітря на територіях розміщення газових свердловин та превентивного прогнозу надзвичайних ситуацій, пов'язаних з аварійним фонтануванням.

4. Перевірка адекватності розроблених математичних моделей здійснювалась шляхом порівняння результатів моделювання з даними натурних вимірювань концентрації газових токсичних речовин в атмосферному повітрі при фонтануванні однієї із свердловин газоконденсатного родовища Полтавської області. Встановлено, що похибка моделювання не перевищувала 15 % за всіма компонентами газової суміші, що є абсолютно прийнятним для такого класу задач. Це свідчить про високу адекватність розроблених моделей і перспективи їх використання для вирішення актуальних задач охорони атмосферного повітря на територіях розміщення газових свердловин.

### Література

1. Werner, A. K., Vink, S., Watt, K., Jagals, P. (2015). Environmental health impacts of unconventional natural gas development: A review of the current strength of evidence. *Science of The Total Environment*, 505, 1127–1141. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.10.084>
2. McKenzie, L. M., Witter, R. Z., Newman, L. S., Adgate, J. L. (2012). Human health risk assessment of air emissions from development of unconventional natural gas resources. *Science of The Total Environment*, 424, 79–87. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.02.018>
3. Kovach, V., Lysychenko, G. (2017). Toxic Soil Contamination and Its Mitigation in Ukraine. *Soil Science Working for a Living*, 191–201. doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-45417-7\\_18](https://doi.org/10.1007/978-3-319-45417-7_18)
4. Sule, I. O., Khan, F., Butt, S. (2018). Experimental investigation of gas kick effects on dynamic drilling parameters. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 9 (1), 605–616. doi: <https://doi.org/10.1007/s13202-018-0510-z>
5. Chadwell, L. J., Blundon, C., Anderson, C., Cacho, H. M. (2000) Incidents Associated with Oil and Gas Operations. Herndon, VA. URL: <https://www.bsee.gov/sites/bsee.gov/files/incident-summaries/incident-histories/finalocs98-pdf.pdf>
6. Macey, G. P., Breech, R., Chernaik, M., Cox, C., Larson, D., Thomas, D., Carpenter, D. O. (2014). Air concentrations of volatile compounds near oil and gas production: a community-based exploratory study. *Environmental Health*, 13 (1). doi: <https://doi.org/10.1186/1476-069x-13-82>
7. Чудновский, Д. М., Долгушин, В. А., Леонтьев, Д. С., Крушевский, С. В. (2015). Фонтан лучше предупредить, нежели ликвидировать. Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов, 2, 202–207.
8. Lysychenko, G., Weber, R., Kovach, V., Gertsyuk, M., Watson, A., Krasnova, I. (2015). Threats to water resources from hexachlorobenzene waste at Kalush City (Ukraine) – a review of the risks and the remediation options.

Environmental Science and Pollution Research, 22 (19), 14391–14404. doi: <https://doi.org/10.1007/s11356-015-5184-1>

9. Попов, О. О., Яцишин, А. В., Ковач, В. О., Артемчук, В. А., Тарадуда, Д. В., Собина, В. А. та ін. (2019). Аналіз можливих причин виникнення надзвичайних ситуацій на АЕС з метою мінімізації ризику їх виникнення. Ядерна та радіаційна безпека, 1 (81), 75–80. doi: [https://doi.org/10.32918/nrs.2019.1\(81\).13](https://doi.org/10.32918/nrs.2019.1(81).13)

10. Edwards, P. M., Young, C. J., Aikin, K., deGouw, J., Dubé, W. P., Geiger, F. et. al. (2013). Ozone photochemistry in an oil and natural gas extraction region during winter: simulations of a snow-free season in the Uintah Basin, Utah. Atmospheric Chemistry and Physics, 13 (17), 8955–8971. doi: <https://doi.org/10.5194/acp-13-8955-2013>

11. Litovitz, A., Curtright, A., Abramzon, S., Burger, N., Samaras, C. (2013). Estimation of regional air-quality damages from Marcellus Shale natural gas extraction in Pennsylvania. Environmental Research Letters, 8 (1), 014017. doi: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/1/014017>

12. Soeder, D. J., Sharma, S., Pekney, N., Hopkinson, L., Dilmore, R., Kutcho, B. et. al. (2014). An approach for assessing engineering risk from shale gas wells in the United States. International Journal of Coal Geology, 126, 4–19. doi: <https://doi.org/10.1016/j.coal.2014.01.004>

13. Garcia-Aristizabal, A., Capuano, P., Russo, R., Gasparini, P. (2017). Multi-hazard risk pathway scenarios associated with unconventional gas development: Identification and challenges for their assessment. Energy Procedia, 125, 116–125. doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.08.087>

14. Шкица, Л. Е., Яцишин, Т. М., Попов, А. А., Артемчук, В. А. (2013). Прогнозирование распространения загрязняющих веществ в атмосфере на территории буровой установки. Нефтяное хозяйство, 11, 136–140.

15. Методика расчета параметров выбросов и валовых выбросов вредных веществ от факельных установок сжигания углеводородных смесей (1996). М.: ВНИИгаз, 45.

16. Cabaneros, S. M., Calautit, J. K., Hughes, B. R. (2019). A review of artificial neural network models for ambient air pollution prediction. Environmental Modelling & Software, 119, 285–304. doi: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.06.014>

17. Danaev, N. T., Temirbekov, A. N., Malgazhdarov, E. A. (2013). Modeling of Pollutants in the Atmosphere Based on Photochemical Reactions. Eurasian Chemico-Technological Journal, 16 (1), 61–71. doi: <https://doi.org/10.18321/ectj170>

18. Nikezic, D., Loncar, B., Grsic, Z., Dimovic, S. (2014). Mathematical modeling of environmental impacts of a reactor through the air. Nuclear Technology and Radiation Protection, 29 (4), 268–273. doi: <https://doi.org/10.2298/ntrp1404268n>

19. Kim, H., Lee, J.-T. (2019). On inferences about lag effects using lag models in air pollution time-series studies. Environmental Research, 171, 134–144. doi: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.12.032>

20. Alimissis, A., Philippopoulos, K., Tzanis, C. G., Deligiorgi, D. (2018). Spatial estimation of urban air pollution with the use of artificial neural network

models. *Atmospheric Environment*, 191, 205–213. doi: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.07.058>

21. Lu, J., Dai, H. C. (2018). Numerical modeling of pollution transport in flexible vegetation. *Applied Mathematical Modelling*, 64, 93–105. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2018.06.039>

22. Clauset, A., Post, K. (2019). Modeling air pollution regulation. *Science*, 364 (6438), 347. doi: <https://doi.org/10.1126/science.364.6438.347-a>

23. Abdallah, C., Afif, C., El Masri, N., Öztürk, F., Keleş, M., Sartelet, K. (2018). A first annual assessment of air quality modeling over Lebanon using WRF/Polyphemus. *Atmospheric Pollution Research*, 9 (4), 643–654. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apr.2018.01.003>

24. Steinberga, I., Sustere, L., Bikse, J., Jr, J. B., Kleperis, J. (2019). Traffic induced air pollution modeling: scenario analysis for air quality management in street canyon. *Procedia Computer Science*, 149, 384–389. doi: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.01.152>

25. Lancia, G., Rinaldi, F., Serafini, P. (2018). A Facility Location Model for Air Pollution Detection. *Mathematical Problems in Engineering*, 2018, 1–8. doi: <https://doi.org/10.1155/2018/1683249>

26. Song, C., Huang, G., Zhang, B., Yin, B., Lu, H. (2019). Modeling Air Pollution Transmission Behavior as Complex Network and Mining Key Monitoring Station. *IEEE Access*, 7, 121245–121254. doi: <https://doi.org/10.1109/access.2019.2936613>

27. Дроздова, Т. И., Рябцев, М. А. (2018) Анализ причинно-следственных связей возгорания газового фонтана на газоконденсатном месторождении. *XXI век. Техносферная безопасность*, 3 (4), 112–120. doi: <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-4-112-120>

28. Яцишин, Т. М. (2017). Аналіз впливу аварійних ситуацій на навколишнє середовище при бурінні нафтогазових свердловин. *Моделювання та інформаційні технології*, 78, 81–88.

29. Яцишин, Т. М. (2018). Вибір критеріїв системи управління екологічними ризиками під час спорудження нафтогазових свердловин. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*, 2 (67), 31–40. doi: [https://doi.org/10.31471/1993-9973-2018-2\(67\)-31-40](https://doi.org/10.31471/1993-9973-2018-2(67)-31-40)

30. Popov, O., Yatsyshyn, A. (2017). Mathematical Tools to Assess Soil Contamination by Deposition of Technogenic Emissions. *Soil Science Working for a Living*, 127–137. doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-45417-7\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-319-45417-7_11)

31. Kryzhanivskyi, Y. I., Panevnyk, D. O. (2019). The study on the flows kinematics in the jet pump's mixing chamber. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 1, 62–68. doi: <https://doi.org/10.29202/nvngu/2019-1/7>

32. Капцов, О. В. (2009). Методы интегрирования уравнений с частными производными. М.: Физматлит, 184.

33. Попов, О. О., Яцишин, А. В., Ковач, В. О., Артемчук, В. А., Тарадуда, Д. В., Собина, В. А. та ін. (2018). Концептуальні підходи до створення інформаційно-аналітичної експертної системи для оцінки впливу АЕС на довкілля. *Ядерна та радіаційна безпека*, 3 (79), 56–65. doi: [https://doi.org/10.32918/nrs.2018.3\(79\).09](https://doi.org/10.32918/nrs.2018.3(79).09)